تراشکاری ارتعاشی با اولتراسونیک یک جهته و بیضوی بر روی قطعه کار In738 *

سعید امینی[۱] محمد جواد ناطق[۲] امیر عبدا...[۳]

چکیده *در این تحقیق تراشکاری ارتعاشی، تراشکاری ارتعاش بیضوی و تراشکاری معمولی بر روی قطعه کـار سـوپر آلیـاژ In738 مـورد آزمایش قرار گرفته است. این آزمایش‌ها با ابزار الماس تک کریستال و دستگاه تـراش CNC انجـام شـد. جهـت اعمـال ارتعـاش در فرآینـد تراشکاری ارتعاشی در جهت سرعت برشی و در فرآیند تراشکاری ارتعاش بیضوی در جهت سرعت برشی و عمق برش مـی‌باشـد. فرکـانس ارتعاشی 36.16 Khz و دامنه $4\mu m$ می‌باشد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که نیروی ماشین‌کاری و زبری سطح در تراشکاری ارتعاش بیضـوی، کمتر از تراشکاری ارتعاشی و تراشکاری معمولی است. در فرآیند تراشکاری ارتعاش بیضوی، زبری سطح هم در جهت برشی و هم در جهت پیشروی، کمتر از دو فرآیند دیگر می‌باشد. سپس با تغییر پارامترهای ماشین‌کاری شامل، سـرعت برشـی، پیشـروی و دامنـه ارتعـاش، نیـروی ماشین‌کاری و زبری سطح در فرآیندهای فوق بررسی و مقایسه گردید.*

واژه‌های کلیدی تراشکاری ارتعاشی (VC)، تراشکاری ارتعاش بیضوی (EVC)، ماشین‌کاری In738

Vibration Cutting and Elliptical Ultrasonic Vibration Assisted Turning of In738 Work-Pieces

S. Amini M.J. Nategh A. Abdollah

Abstract *Vibration cutting (VC), elliptical vibration cutting (EVC) and ordinary cutting (OC) of In738 work-pieces have been experimentally investigated in the present research. The experiments were carried out by using single crystal diamond tool and ultra-precision CNC lathe. Vibration frequency is 36.16KHz and the amplitude is* $4\mu m$. *The influence of various cutting parameters including cutting speed, feed-rate, vibration amplitude and phase angle on the cutting force, surface roughness and tool life have been studied and the results have been compared. The results indicate that the cutting force in EVC is much less than the two other processes. The surface roughness in both the cutting and feed directions was also less than those in other processes.*

Key Words Vibration cutting (VC), elliptical vibration cutting (EVC), In738 machining

* نسخه نخست مقاله در تاریخ ۹۰/۱/۲۹، اولین پذیرش آن در تاریخ ۹۰/۱۰/۱۴ و نسخه آماده چاپ آن در تاریخ ۹۱/۵/۹ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده‌ی مسؤول: استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان

(۲) دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

(۳) دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مقدمه

فرآیند ماشین‌کاری ارتعاشی با اولتراسونیک یکی از روش‌های ماشین‌کاری پیشرفته می‌باشد. در این روش به ابزار برشی حین عملیات ماشین‌کاری، ارتعاشی تحت فرکانس و دامنه ثابت، اعمال می‌گردد. اگر ارتعاش اولتراسونیک در یک جهت (در جهت سرعت برشی) اعمال گردد، ماشین‌کاری ارتعاشی (Vibration Cutting-VC) و اگر در دو جهت (در جهت‌های سرعت برشی و عمق برش) اعمال گردد، ماشین‌کاری ارتعاش بیضوی (Elliptical Vibration Cutting-EVC) می‌باشد.

مطالعه فرآیند EVC توسط شاموتو [1] در سال۱۹۹۳ انجام شد. او نشان داد که اعمال ارتعاش بیضوی به ابزار، مزیت‌های بهتری نسبت به ارتعاش خطی از جمله، کاهش بیشتر نیروی ماشین‌کاری و زبری سطح را داراست [2-3].

شاموتو و موریواکی [4] فرآیند برش ارتعاشی را در دو جهت، با عنوان ماشین‌کاری ارتعاشی بیضوی انجام دادند. این نوع فرآیند باعث حرکت ارتعاش بیضوی ابزار می‌شود که ضخامت براده و نیروی برشی را کاهش می‌دهد. آنان توسط عمل کننده پیزوالکتریک، ابزار تراشکاری را در دو جهت (با فرکانس 19KHz) مرتعش کردند و در تحلیل تئوری و عملی نشان دادند که نیروهای ماشین‌کاری بسیار کمتر از حالتی است که ارتعاش اولتراسونیک در یک جهت اعمال گردد. بابیتسکی و همکاران [5] تحلیل غیر خطی به صورت Vibro-impact بر روی فرآیند ماشین‌کاری ارتعاشی با اولتراسونیک را انجام دادند. آنها نشان دادند که با اعمال مود Vibro-impact بر قطعه کار، تغییرات زیادی بر ویژگی‌های دینامیکی ماشین‌کاری حاصل می‌شود و پاسخ دامنه غیر خطی ابزار برشی را به دست آوردند. ترانگ و همکاران [6] با نصب یک پیزوالکتریک بر روی ابزار تراشکاری و انجام آزمایشVC، نشان دادند که ابزار ارتعاشی، می‌تواند تابع پاسخ فرکانسی را بهینه کند. بنابراین پایداری ماشین‌کاری در عملیات تراشکاری بهینه می‌گردد. ماشین‌کاری به کمک ارتعاش اولتراسونیک روش پیشرفته و مناسبی به منظور ماشین‌کاری مواد سخت برش از قبیل سوپر آلیاژ، سرامیک، تنگستن و شیشه می‌باشد [7-10].

در این تحقیق به بررسی ماشین‌کاری سوپر آلیاژ In738 در فرآیندهای EVC، VC و تراشکاری معمولی (Ordinary Cutting-OD) پرداخته می‌شود. این آزمایش‌ها با استفاده از ابزار ارتعاشی دو جهته (که قابلیت ارتعاش در یک جهت را دارد)، دستگاه تراش CNC انجام می‌شود. نیروی ماشین‌کاری توسط دینامومتر و زبری سطح در جهت‌های برشی و پیشروی اندازه‌گیری می‌شود. با تغییر پارامترهای ماشین‌کاری شامل سرعت برشی، پیشروی، دامنه ارتعاش و زاویه فاز، تأثیر تغییر این پارامترها بر نیروی ماشین‌کاری و زبری سطح در فرآیندهای EVC و VC بررسی می‌گردد.

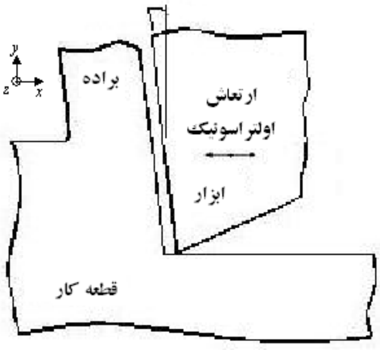
فرآیندهای VC و EVC

شکل (۱) نمای کلی فرآیندهای VC و EVC را نشان می‌دهد.

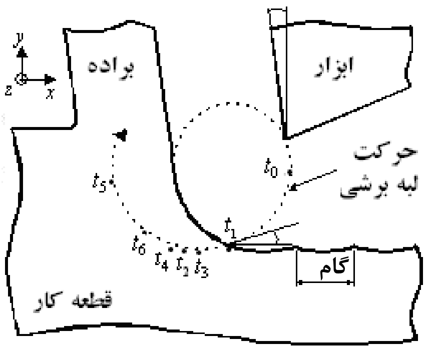
شکل (۱- الف) فرآیند VC را نشان می‌دهد. ابزار برشی به صورت خطی در جهت سرعت برشی، ارتعاش می‌کند در این فرآیند:

$$x = a\sin(2\pi ft)\ ,\qquad \text{Vibration Speed} = 2\pi fa\cos(2\pi ft) \qquad (۱)$$

a دامنه ارتعاش، f فرکانس ارتعاش و t زمان می‌باشد.



(الف)



(ب)

شکل ۱ فرآیندهای الف) VC و ب) EVC

شکل (۱- ب) فرآیند EVC را در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد. شروع برش در زمان t_1 می‌باشد. پس از گذشت مدت کمی تا زمان t_2، براده بر سطح براده ابزار می‌نشیند. این قسمت کم ممکن است عملیات کشیدن بر روی قطعه کار یا Burnishing باشد که به دلیل داشتن شعاع نوک ابزار می‌باشد. بعد از زمان t_2، قطعه کار، برش می‌یابد و براده شکل می‌گیرد. t_6 زمانی است که مماس بر مسیر برش و هم‌راستا با جهت برشی می‌شود؛ که در این لحظه، جهت اصطکاک عکس می‌شود. در نزدیک زمان t_6، ابزار با براده در جهت برش با هم حرکت می‌کنند بدون این که اصطکاک یک دفعه تغییر جهت بدهد که به دلیل وجود الاستیسیته می‌باشد. ابزار در زمان t_5، زمانی که مماس بر منحنی حرکت منطبق با سطح براده ابزار گردد، از قطعه کار جدا می‌شود. نیروی اصطکاک کاهش یافته یا عکس شده باعث کاهش نیروی برشی، انرژی و تمرکز حرارت می‌شود. از t_1 تا t_6 تراشکاری معمولی است و مثل ابزار ثابت، براده بر روی سطح براده ابزار حرکت می‌کند. اختلاف سرعت ابزار و براده مثل تراشکاری معمولی است. از t_6 تا t_5 ابزار با براده به سمت بالا حرکت می‌کند و اختلاف سرعت ابزار و براده تغییر می‌کند و جهت نیروی اصطکاک تغییر می‌کند. پس در EVC زاویه φ بزرگتر می‌شود و این باعث کاهش نیروی اصلی در جهت سرعت برشی (Principal Force) می‌شود.

در این فرآیند:

$$x = a\sin(2\pi ft)\ ,\ y = b\sin(2\pi ft + \phi)\ ,$$
$$\text{Horizontal vibration Speed} = 2\pi fa\cos(2\pi ft) \qquad (۲)$$

a, b دامنه‌های ارتعاش بیضوی و ϕ زاویه فاز می‌باشند.

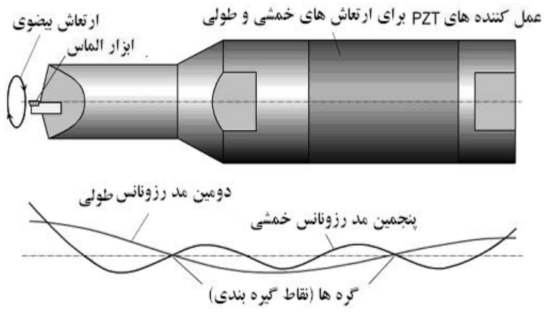
در فرآیندهای EVC و VC، حداکثر سرعت ارتعاش افقی باید بیشتر از سرعت برشی باشد یعنی:

$$2\pi fa > v_w \qquad (۳)$$

به طوری که v_w سرعت برشی می‌باشد.

آماده سازی فرآیندها

ابزار ارتعاشی ماشین‌کاری ارتعاش بیضوی با طراحی مود ارتعاش خمشی و طولی ساخته شده است. با طراحی ابزار ارتعاشی توسط نرم افزار Ansys و تحلیل مودال و به دست آوردن بهترین شرایط مود خمشی و طولی در فرکانس مورد نظر، ابعاد و هندسه ابزار ارتعاشی به دست می‌آید. شکل (۲) ابزار و تداخل مود خمشی و طولی آن را نشان می‌دهد [11].



شکل ۲ ابزار ارتعاشی و تداخل مود خمشی و طولی آن [11]

شکل (۳) ابزار ارتعاشی ساخته شده به همراه سیستم کنترل آن را نشان می‌دهد. این ابزار دارای فرکانس ارتعاشی 36.16 KHz و دامنه $0-4\mu m$ می‌باشد. سیستم کنترل، شامل دو ژنراتور و یک کنترل کننده مرکزی می‌باشد. با کنترل هرکدام از ژنراتورها یک مود ارتعاشی تحت کنترل قرار می‌گیرد و شکل ارتعاش مورد نظر به صورت خطی، دایروی و بیضوی حاصل می‌گردد.

تجهیزات استفاده شده برای انجام آزمایش‌ها عبارتند از:

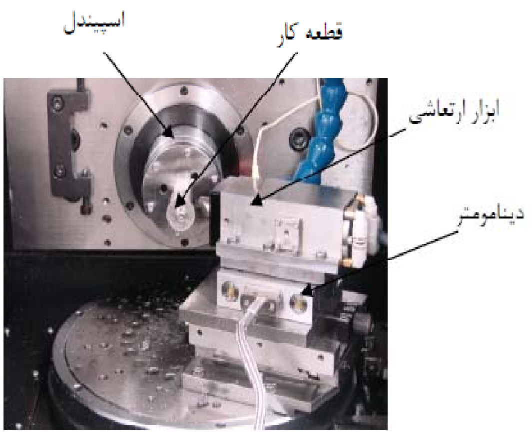
- دستگاه تراش ٤ محوره CNC (AHN05-Toyoda co.) برای انجام آزمایش‌های VC، EVC و OC.
- ابزار ارتعاشی که قابلیت اعمال ارتعاش یک جهته و دو جهته را دارد، این ابزار دارای فرکانس ارتعاشی 36.16 Khz و دامنه $0-4\mu m(p-p)$ می‌باشد.
- دستگاه اندازه‌گیری زبری سطح (ساخت شرکت Kosaka با مدل ET4000A) به منظور اندازه‌گیری زبری سطح در جهت پیشروی و در جهت سرعت برشی.
- دستگاه Laser Vibrometer (مدل AT0042) به منظور اندازه‌گیری فرکانس، دامنه و شکل ارتعاش (دایره‌ای، بیضوی و خطی) ابزار.
- دینامومتر با تحمل نیرویی 250 N (ساخت شرکت Kistler مدل 9050).
- اینسرت الماس تک کریستال (با کد PF-57047 ساخت شرکت .A.L.M.T.Corp).
- قطعه کار: سوپر آلیاژ In738 با قطر 24 میلی متر و طول 22 میلی متر.



شکل ۳ ابزار ارتعاش بیضوی به همراه سیستم کنترل آن

آزمایش‌ها

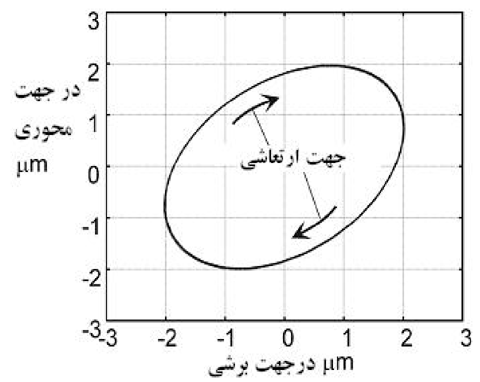
پس از آماده سازی قطعه کار و انجام عملیات پیش ماشین‌کاری بر روی آن و بستن ابزار و دیگر تجهیزات بر روی ماشین تراش CNC چهار محوره شرایط کار برای انجام آزمایش‌ها مهیا گردید. شکل(٤) آماده سازی آزمایش‌ها پس از نصب ابزار ارتعاشی و قطعه کار بر روی دستگاه را نشان می‌دهد.



شکل ٤ آماده سازی آزمایش‌ها

مطابق شکل (٤) ابزار ارتعاشی بر روی دینامومتر و محور B دستگاه تراش نصب شده است. با کنترل ابزار ارتعاشی می‌توان شکل مورد نظر حرکت ابزار را به صورت خطی، دایروی و بیضوی به دست آورد. توسط این ابزار می‌توان هم ارتعاش یک جهته (در جهت سرعت برشی) و هم ارتعاش دو جهته (بیضوی) اعمال کرد. این ابزار دارای دو ژنراتور می‌باشد که هر کدام ارتعاش را در یک جهت اعمال و کنترل می‌کنند. در صورتی که یک ژنراتور مشغول به کار باشد ارتعاش یک جهته، اگر دو ژنراتور مشغول به کار باشد ارتعاش دو جهته و اگر ژنراتورها خاموش باشند، فرآیند تراشکاری، معمولی می‌باشد.

حرکت‌های ابزار به صورت دایره‌ای و خطی و فرکانس ارتعاشی توسط دستگاه Laser Vibrometer به دست آمد. این دستگاه ارتعاشات ابزار را در قسمت تحلیل‌گر آن مورد پردازش و خروجی آن بر روی صفحه نمایش دستگاه فانکشن ژنراتور نشان می‌دهد. نمونه‌ای از نتیجه حاصل از این اندازه‌گیری در شکل (۵) آورده شده است. زاویه فاز بین دو جهت ارتعاشی، شکل ارتعاش را مشخص می‌کند؛ به طوری که اگر زاویه فاز ۹۰ درجه باشد، شکل ارتعاش دایروی و در زوایای دیگر شکل ارتعاش بیضوی خواهد بود. در شکل (۵) زاویه فاز ۱۳۵ درجه می‌باشد.



شکل ۵ نمودار شکل ارتعاش ابزار ارتعاشی

تنظیمات لازم بر روی ژنراتورهای دستگاه ابزار ارتعاشی طوری صورت می‌گیرد که ارتعاش مورد نظر مطابق شکل (۵) حاصل گردد. این کار با تنظیم سه ولوم که دو ولوم برای ارتعاش دو جهته و یک ولوم برای تغییرات فاز می‌باشد، انجام می‌شود.

سپس شرایط آماده سازی آزمایش به ترتیب زیر انجام شد:

- ماشین‌کاری اولیه بر روی قطعه کار، به منظور به دست آوردن شرایط هندسی مناسب قطعه کار متناسب با دقت دستگاه تراش CNC.
- تنظیمات بر روی دینامومتر (۲۵۰ نیوتنی) به منظور اندازه‌گیری نیرو.
- تنظیمات بر روی ژنراتور ابزار ارتعاشی متناسب با دامنه ارتعاش و نحوه حرکت ابزار (خطی، دایروی یا بیضوی).
- تنظیم دقیق مرکز ابزار با مرکز سه نظام دستگاه.

پارامترهای مورد نظر برای انجام آزمایش‌های EVC و VC شامل سرعت برشی، سرعت پیشروی، عمق برش، فاز ارتعاشی و دامنه ارتعاش در جدول‌های (۳-۱) آورده شده است.

طول ماشین‌کاری روی قطعه کار برای هر مرحله آزمایش حدود 0.7 mm است و پارامترهای ماشین‌کاری فوق توسط برنامه نویسی CNC به ماشین معرفی شد. برای آزمایش‌هایی که نیاز به تغییر دامنه یا فاز ارتعاشی دارند، توسط دستگاه Laser Vibrometer شرایط تنظیم کنترلر ابزار ارتعاشی برای به دست آوردن دامنه و شکل ارتعاشی مورد نظر به دست می‌آید و موقع آزمایش همان شرایط به دست آمده توسط دستگاه Laser Vibrometer، بر روی کنترلر ابزار ارتعاشی تنظیم می‌شود. نیروی ماشین‌کاری در حین آزمایش، توسط دینامومتر مربوطه اندازه‌گیری شد.

جدول ۱ پارامترهای آزمایش EVC

شماره	سرعت برشی m/min	سرعت پیشروی µm / rev	عمق برش µm	زاویه فاز (درجه)	دامنه ارتعاش µm
۱	۳	۲۰	٤	۹۰	٤
۲	۱	۲۰	٤	۹۰	٤
۳	۰/٥	۲۰	٤	۹۰	٤
٤	۰/۳	۲۰	٤	۹۰	٤
٥	۰/۳	۱۰	٤	۹۰	٤
٦	۰/۳	۳۰	٤	۹۰	٤
۷	۰/۳	۲۰	٤	٤٥	٤
۸	۰/۳	۲۰	٤	۱۳٥	٤
۹	۰/۳	۲۰	٤	۹۰	۱
۱۰	۰/۳	۲۰	٤	۹۰	۲
۱۱	۰/۳	۲۰	٤	۹۰	a=۱ , b=۰/٥
۱۲	۰/۳	۲۰	٤	۹۰	a=۲ , b=۰/٥
۱۳	۰/۳	۲۰	٤	۹۰	a=۰/٥ , b=۱
۱٤	۰/۳	۲۰	٤	۹۰	a=۰/٥ , b=۲

جدول ۲ پارامترهای آزمایش VC

شماره	سرعت برشی m/min	سرعت پیشروی µm / rev	عمق برش µm	دامنه ارتعاش (p-p) µm
۱	۳	۲۰	٤	٤
۲	۱	۲۰	٤	٤
۳	۰/٥	۲۰	٤	٤
٤	۰/۳	۲۰	٤	٤
٥	۰/۳	۱۰	٤	٤
٦	۰/۳	۳۰	٤	٤
۷	۰/۳	۲۰	٤	۲

جدول ۳ پارامترهای آزمایش ماشین‌کاری معمولی

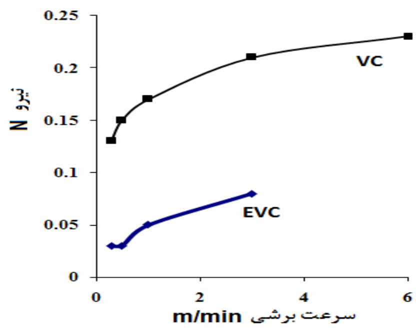
شماره	سرعت برشی m/min	سرعت پیشروی µm / rev	عمق برش µm
۱	۲۸	۲۰	٤

نتایج آزمایش‌ها

پس از انجام آزمایش‌ها، نیروهای ماشین‌کاری آزمایش‌ها توسط دینامومتر به دست آمد. سپس توسط دستگاه اندازه‌گیری زبری، زبری سطح (در جهت‌های سرعت برشی و پیشروی) مناطق آزمایش شده از قطعه کار اندازه‌گیری شد. با به دست آوردن نمودارهای مربوطه توسط نرم افزار Excel، نتایج آزمایش به شرح زیر حاصل گردید:

بررسی نیروی ماشین‌کاری

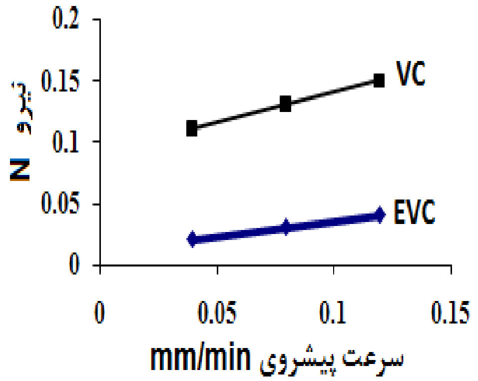
مقایسه نیرو در فرآیندهای EVC و VC در شکل (٦) آورده شد. در این آزمایش‌ها سرعت پیشروی 20 μm / rev و دامنه ارتعاش 4 μm می‌باشد.



شکل ٦ مقایسه نیرو در EVC و VC

در ماشین‌کاری معمولی نیروی اصلی 1.9 N اندازه‌گیری شد. مطابق شکل (٦) و نیروی حاصل از ماشین‌کاری معمولی، نیروی ماشین‌کاری به ترتیب در فرآیندهای VC ،EVC و OC کمتر است، افزایش سرعت برشی باعث افزایش نیروی ماشین‌کاری در فرآیندهای EVC و VC می‌شود و علت آن افزایش زمان درگیری ابزار با قطعه کار می‌باشد. هر چه سرعت برشی افزایش یابد، زمان درگیری بین ابزار و قطعه کار بیشتر شده و فرآیندهای EVC و VC به سمت فرآیند ماشین‌کاری معمولی پیش می‌رود و در نتیجه، نیروی ماشین‌کاری افزایش می‌یابد.

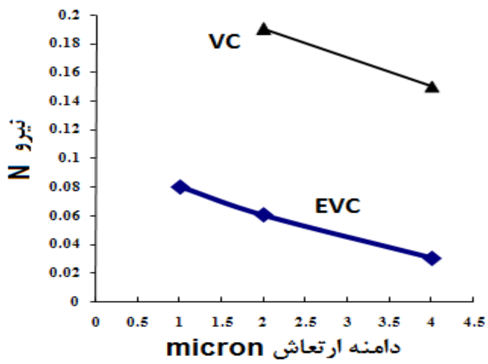
شکل (۷) تأثیر سرعت پیشروی را بر نیروی ماشین‌کاری در فرآیندهای EVC و VC نشان می‌دهد. در این آزمایش‌ها سرعت برشی 0.3 m/min و دامنه ارتعاش 4 μm می‌باشد.



شکل ۷ تأثیر سرعت پیشروی را بر نیروی ماشین‌کاری در فرآیندهای EVC و VC

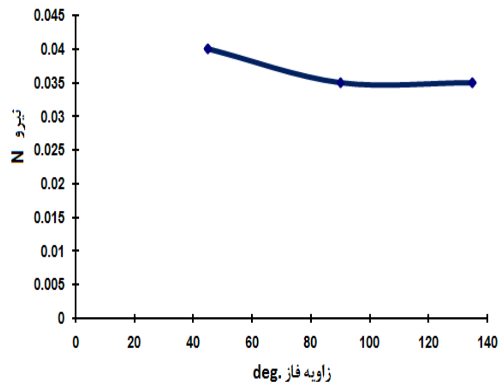
مطابق شکل (۷)، افزایش سرعت پیشروی باعث افزایش نیروی ماشین‌کاری در فرآیندها می‌شود که بر اساس مکانیک برش فلز، افزایش سرعت پیشروی سطح درگیری ابزار و قطعه کار را زیاد کرده و در نتیجه نیروی ماشین‌کاری را افزایش می‌دهد.

شکل (۸) تأثیر تغییر دامنه ارتعاش بر نیروی ماشین‌کاری در فرآیندهای EVC و VC را نشان می‌دهد. در این آزمایش‌ها، سرعت برشی، 0.3 m/min و سرعت پیشروی، 20 μm / rev می‌باشد.



شکل ۸ تأثیرتغییردامنه ارتعاش بر نیروی ماشین‌کاری در فرآیندهای EVC و VC

مطابق شـکل (۸) افـزایش دامنـه ارتعـاش باعـث کاهش نیروی ماشین‌کاری می‌گردد و ایـن بـه دلیـل آن است که افزایش دامنه ارتعاش، زمان درگیری بین ابزار و قطعـه کـار را کـاهش مـی‌دهـد؛ در نتیجـه نیـروی ماشین‌کاری کاهش می‌یابد. شکل (۹) تأثیر تغییر زاویـه فاز حرکت ارتعاش بیضوی را بر نیـروی ماشـین‌کـاری نشـان مـی‌دهـد. در ایـن آزمـایش‌هـا سـرعت برشـی 0.3m/min، دامنه ارتعـاش 4 µm و سـرعت پیشـروی 20 µm / rev می‌باشد.

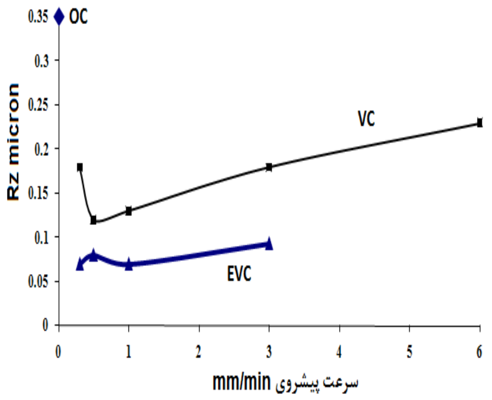


شکل ۹ تأثیر تغییر زاویه فاز حرکت ارتعاش بیضوی بر نیروی ماشین‌کاری

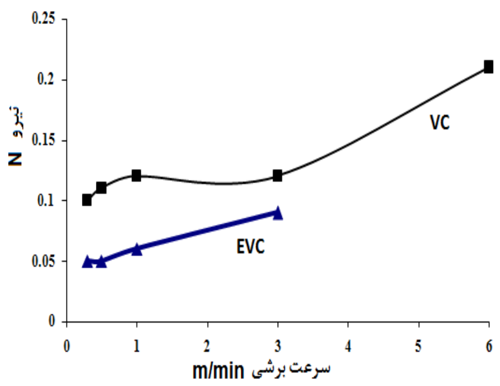
مطابق شکل (۹)، افزایش زاویه فاز تا مقـدار °90 باعث کاهش نیروی اصلی ماشین‌کـاری مـی‌شـود و از °90 به بعد، مقدار نیـروی اصـلی ماشـین‌کـاری ثابـت می‌ماند. از آنجایی که در فرآیند EVC، افـزایش زاویـه فاز از °45 تا °90، باعـث کـاهش زاویـه ورودی ابـزار می‌شود، نیروی لازم برای براده برداری مقـداری کمتـر می‌شود. ولی این کاهش زاویه از °90 بـه بعـد متوقـف می‌شود و در نتیجه نیروی ماشین‌کاری به سمت مقـدار ثابتی میل می‌کند.

بررسی زبری سطح

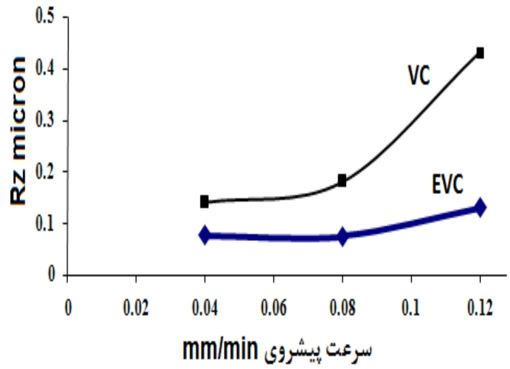
مقایسه زبری سـطح در فرآینـدهای EVC، VC و OC در شـکل‌هـای (۱۱و۱۰) در جهـت‌هـای پیشـروی و سرعت برشـی آورده شـده اسـت. مطـابق شـکل (۱۰) زبری سطح به ترتیب در فرآیندهای EVC، VC و OC کمتـر اسـت و مطـابق شـکل‌هـای (۱۱و۱۰) افـزایش سرعت برشی باعث افزایش زبری سـطح در فرآینـدها شده است که دلیل آن افزایش زمان درگیـری ابـزار بـا قطعه کار می‌باشد. هر چه سرعت برشی افـزایش یابـد، زمان درگیری بـین ابـزار و قطعـه کـار بیشـتر شـده و فرآیندهای EVC و VC به سمت فرآیند ماشـین‌کـاری معمولی پیش می‌رود و در نتیجه زبری سـطح افـزایش می‌یابـد. تـأثیر سـرعت پیشـروی بـر زبـری سـطح در فرآیندهای EVC و VC در شکل‌هـای (۱۳و۱۲) آورده شده است. در این آزمایش‌ها سرعت برشی 0.3m/min و دامنه ارتعاش 4 µm می‌باشد.



شکل ۱۰ مقایسه زبری سطح در جهت سرعت پیشروی

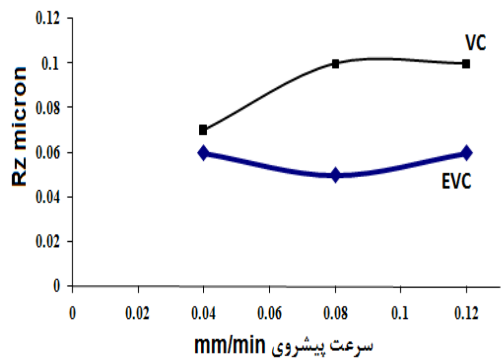


شکل ۱۱ مقایسه زبری سطح در جهت سرعت برشی



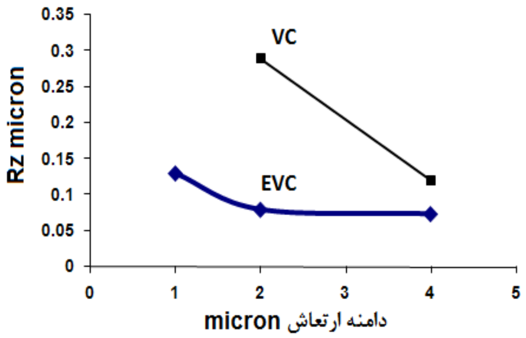
شکل ۱۲ تأثیر سرعت پیشروی بر زبری سطح در جهت پیشروی

مطابق شکل (۱۲) تـأثیر افـزایش زبـری سـطح بـا افزایش سرعت پیشروی در فرآیند EVC بیشتر است و مطابق شکل (۱۳) افزایش سرعت پیشروی تأثیر زیادی بر فرآیند EVC ندارد. تـأثیر تغییـر دامنـه ارتعـاش بـر زبری سطح در شکل‌های (۱۵و۱۴) آورده شـده اسـت. در این آزمایش‌ها سرعت برشی 0.3m/min و سـرعت پیشروی $20\ \mu m/rev$ می‌باشد.

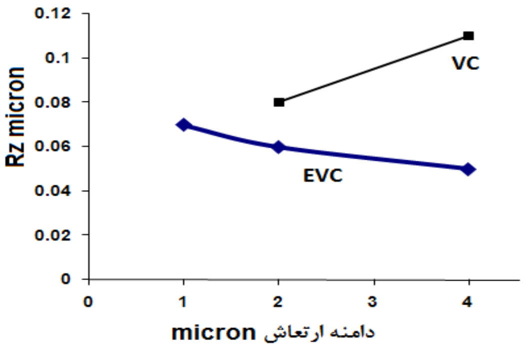


شکل ۱۳ تأثیر سرعت پیشروی بر زبری سطح در جهت سرعت برشی

مطابق شکل (۱٤)، در فرآیند EVC افزایش دامنـه ارتعاش، باعـث کـاهش کنـد زبـری سـطح در جهـت پیشروی می‌شود؛ به طوری که به سـمت مقـدار ثـابتی میل می‌کند. در فرآیند VC افزایش دامنه ارتعاش باعث کاهش شدید زبری سطح در جهت پیشروی می‌شود.

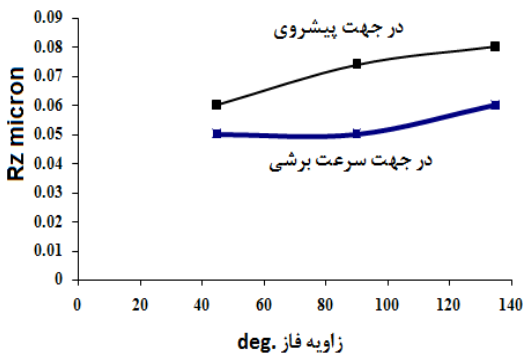


شکل ۱٤ تأثیر دامنه ارتعاش بر زبری سطح در جهت پیشروی



شکل ۱۵ تأثیر دامنه ارتعاش بر زبری سطح در جهت سرعت برشی

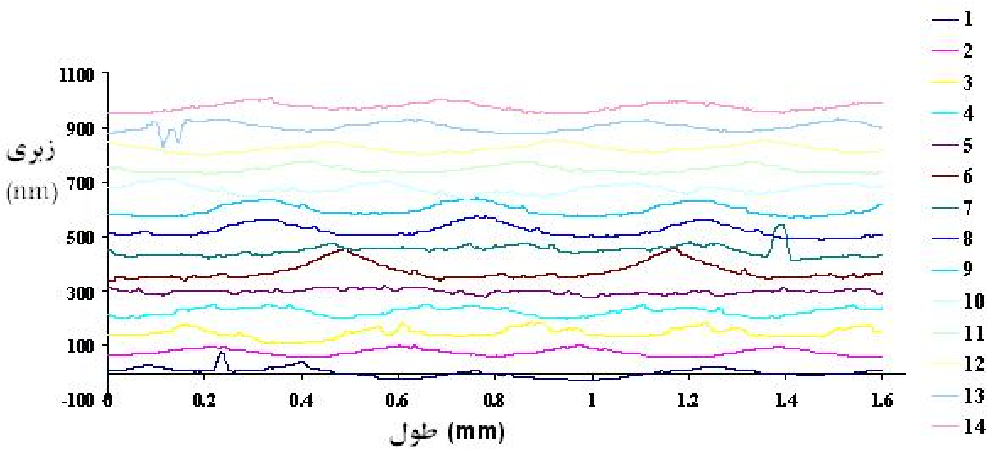
تأثیر تغییر زاویه فاز حرکـت ارتعـاش بیضـوی در فرآیند EVC در شکل (١٦) آورده شده اسـت. در ایـن آزمایش‌ها سـرعت برشـی 0.3m/min، دامنـه ارتعـاش $4\ \mu m$ و سرعت پیشروی $20\ \mu m/rev$ می‌باشد.



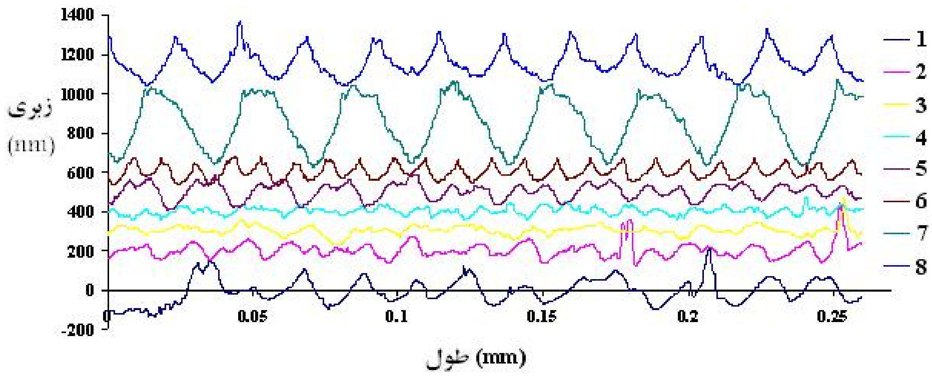
شکل ١٦ تأثیر تغییر زاویه فاز حرکت ارتعاش بیضوی بر زبری سطح در فرآیند EVC

مطابق شکل (۱٦) افزایش زاویه فاز، باعث افزایش کم زبری سطح در جهت پیشروی می‌شود به طوری که به سمت مقدار ثابتی میل می‌کند و افزایش زاویـه فـاز، تأثیر زیادی بر زبری سطح در جهت برشی ندارد.

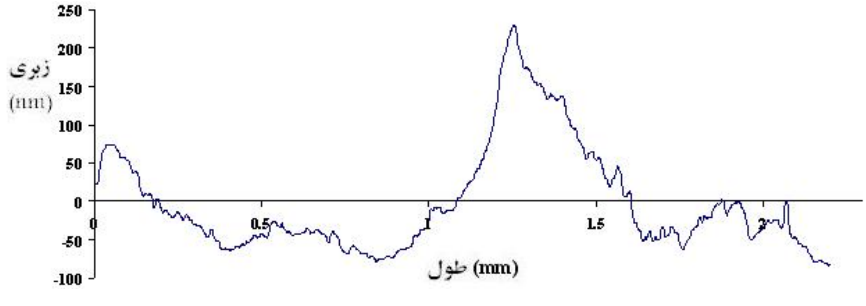
شکل‌های صافی سطح اندازه‌گیری شـده بـر روی قطعه کار IN738 در شکل (۱۹-۱۷) آورده شده است.



شکل ۱۷ نمودارهای زبری سطح آزمایش‌های EVC



شکل ۱۸ نمودارهای زبری سطح آزمایش‌های VC



شکل ۱۹ نمودارهای زبری سطح آزمایش OC

در شکل‌های (۱۸و۱۷) شماره هر زبری سطح مطابق شماره آزمایش انجام شده در جدول‌های (۲و۱) می‌باشد. شکل‌های فوق شرایط کمی زبری سطح هر آزمایش را به خوبی نشان می‌دهد و مقایسه تأثیر پارامترها و فرآیندهای مختلف به خوبی قابل مشاهده می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، آزمایش‌ها بر روی قطعه کار سوپر آلیاژ In738 در فرآیندهای EVC، VC و OC انجام شد. آزمایش‌های انجام شده بر روی قطعه کار سوپر آلیاژ In738، توسط ابزار ارتعاشی دو جهته، ماشین تراش CNC، اینسرت تراشکاری الماس تک کریستال و دینامومتر انجام شد. سپس توسط دستگاه زبری سنج، زبری سطح قطعه کار در جهات پیشروی و برشی اندازه‌گیری شد. در آزمایش‌ها، تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری مثل سرعت برشی، پیشروی و دامنه ارتعاش بر نیرو و زبری سطح در فرآیندها بررسی شد. در فرآیند EVC، تأثیر تغییر فاز بر نیرو و زبری بررسی گردید. از مجموعه تحقیق انجام شده نتایج زیر حاصل گردید:

- با انجام آزمایش‌ها بر روی سوپر آلیاژهای In738 نشان داده شد که کاهش نیروی ماشین‌کاری و بهبود زبری سطح به ترتیب در فرآیندهای EVC، VC و OC، در مورد آلیاژ فوق نیز مورد تأیید است. نیروی ماشین‌کاری با قطعه کار In738 در فرآیند EVC کمتر از فرآیند VC و در فرآیند VC، کمتر از فرآیند OC می‌باشد. هم‌چنین زبری سطح در فرآیند EVC کمتر از فرآیند VC و در فرآیند VC نیز کمتر از فرآیند OC به دست آمد. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان داد که فرآیندهای VC و EVC بر روی قطعه کار In738 قابل اجراست و نتایجی که بر روی مواد دیگر مثل فولاد و آلومینیوم به دست آمده (کاهش نیرو و بهبود صافی سطح) بر روی سوپرآلیاژ نیز صادق است.

مراجع

1. Shamoto, E. and Moriwaki, T., "Fundamental Study on Elliptical Vibration Cutting", *Proceeding of the 8th Annual Meeting, ASPE*, pp. 162-165, (1993).
2. Shamoto, E. and Moriwaki, T., "Study on Elliptical Vibration Cutting", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 43/1, pp. 35-38, (1994).
3. Ma, C.X., Shamoto, E., Moriwaki, T. and Wang, L., "Study of machining accuracy in ultrasonic elliptical vibration cutting", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, pp. 1305-1310, (2004).
4. Shamoto, E., Morimoto, Y. and Moriwaki, T., "Elliptical Vibration Cuttin (1st Report, Cutting Principle and Basic Performance) (in Japanese)", *Journal of Japanese Society Precision Engineering (JSPE)*, Vol. 62/8, pp. 1127-1131, (1996).
5. Astashev, V.K. and Babitsky, V.I., "Ultrasonic cutting as a nonlinear (vibro-impact) process", *Journal of Ultrasonics*, Vol. 36, pp. 89-96, (1998).

6. Tarng, Y.S., Kao, J.Y. and Lee, E.C., "Chatter Suppression in turning operations with a tuned vibration absorber", *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 105, pp. 55-60, (2000).
7. Babitsky, V.I., Kalashnikov, A.N. and Meadows, A., "Ultrasonically assisted turning of aviation materials", *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 132, pp. 157-167, (2003).
8. Suzuki, N., Haritani, M., Yang, J., Hino, R. and Shamoto, E., "Elliptical Vibration Cutting of Tungsten Alloy Molds for Optical Glass Parts", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 56, pp. 127-130, (2007).
9. Kumabe, J., Fuchizawa, S., Soutome, T., Soutome, Y. and Nishimoto, Y., "Ultrasonic superposition vibration cutting of ceramics", *Journal of Precision Engineering*, Vol. 11(2), pp. 71-77, (1989).
10. Shamoto, E. and Moriwaki, T., "Ultaprecision Diamond Cutting of Hardened Steel by Applying Elliptical Vibration Cutting", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 48, pp. 441-444, (1999).
11. Suzuki, N., Haritani, M., Yang, J., Hino, R. and Shamoto, E., "Elliptical Vibration Cutting of Tungsten Alloy Molds for Optical Glass Parts", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 56, pp. 127-130, (2007).